

# ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΕΙΝΩΝ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΕΛΑΙΩΝΑ ΣΕΡΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Τσιντσάρης Αντώνιος, Μάρης Φώτιος

Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 193 Πανταζίδου, 68200, Νέα Ορεστιάδα, Ελλάδα.

[fmarris@fmenr.duth.gr](mailto:fmarris@fmenr.duth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση των ορεινών υδρονομικών έργων και η εξέταση εναλλακτικών σεναρίων υδρονομικής διαχείρισης του χειμάρρου Ελαιώνα Σερρών με την βοήθεια Υδρολογικών Μοντέλων και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ). Ερευνήθηκε η υδρολογική απόκριση του χειμάρρου στις καταιγίδες σχεδιασμού για τρεις περιπτώσεις, μία για την κατάσταση του 1945, μία για την παρούσα κατάσταση και μια για ένα υποθετικό σενάριο. Με την βοήθεια των ΓΣΠ αποκτήθηκαν τα δεδομένα που ήταν απαραίτητα για την εφαρμογή των μοντέλων απωλειών, άμεσης απορροής και διόδευσης. Τα αποτελέσματα για τις τρεις περιπτώσεις δείχνουν μια θετική μεταβολή στα εξαγόμενα υδρογραφήματα που οφείλονται κυρίως στις μεταβολές που συντελέστηκαν στην φυτοκάλυψη της λεκάνης απορροής αλλά και στις συνθήκες ροής μέσα στις κεντρικές κοίτες.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** υδρογράφημα, διόδευση, καλύψεις γης, λεκάνη απορροής.

## EVALUATION OF MOUNTAINOUS HYDRONOMIC WORKS OF THE ELAIONAS TORRENT IN SERRES WITH THE AID OF HYDROLOGIC MODELS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Tsintsaris Antonios, Maris Fotios

Department of Forestry, Environment Management and Natural Resources, Democritus University of Thrace, 193 Pantazidou str. 68200, Nea Orestiada, Greece,

[fmarris@fmenr.duth.gr](mailto:fmarris@fmenr.duth.gr)

## ABSTRACT

The purpose of the present work is the evaluation of the mountainous hydronomic works and the examination of alternative hydronomic management scenarios of the Elaionas torrent in Serres, Greece with the aid of Hydrologic Models and GIS. The hydrologic response of the torrent in storms has been tested for three separate cases: the situation of the year 1945, the present situation and the situation expected in a hypothetical scenario. With the aid of GIS the data necessary for the application of the loss, direct-runoff and routing models was acquired. The results of these cases display a positive alteration in the exported hydrographs mainly due to the alterations in the land covers of the torrent basin and the alterations in the flow conditions of the main watercourses.

**KEYWORDS:** hydrograph, routing, land covers, watershed.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εγκατάλειψη και η αλλαγή των χρήσεων γης στην χαμηλή ημιορεινή και λοφώδη ζώνη κατά το πρώτο ήμισυ του 20<sup>ου</sup> αιώνα, είναι κοινά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν σε πολλές περιοχές της Μακεδονίας. Την ίδια περίοδο σε πολλές λεκάνες απορροής σημαντικά έργα με σκοπό την αποκατάσταση της διαταραγμένης υδρονομικής ισορροπίας εφαρμόζοντας τις αρχές του δασοτεχνικού συστήματος διευθέτησης. Οι μεταβολές αυτές στις ορεινές και ημιορεινές λεκάνες απορροής έχουν αναμφισβήτητα επιδράσει στην ένταση και την συχνότητα των χειμαρρικών φαινομένων, δηλαδή στην παραγωγή και διακίνηση φερτών υλών και στις πλημμύρες. Το μέτρο της επίδρασης αυτής εκφράζεται από τον ετήσιο διακινούμενο όγκο φερτών υλών, τον συνολικό όγκο του νερού και τη χρονική κατανομή του κατά την διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων που εκφράζονται με τα πλημμυρογραφήματα. Η εκτίμηση των μεγεθών αυτών σε χειμαρρικές λεκάνες όπου συνήθως δεν γίνονται μετρήσεις επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά είναι χρήσιμα και για τη χάραξη μιας συνολικής στρατηγικής αντιμετώπισης των χειμαρρικών κινδύνων και ειδικότερα στο επίπεδο σχεδιασμού διαχειριστικών μέτρων και έργων διευθέτησης, επιτρέποντας την εκ των προτέρων μελέτη της επίδρασης τους στη συμπεριφορά των χειμαρρικών συστημάτων.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο χείμαρρος Ελαιώνα διέρχεται από τα ανατολικά της πόλης των Σερρών και η λεκάνη απορροής του εκτείνεται στα βορειοανατολικά της, στις νότιες πλαγιές του Όρους Βροντούς και είναι αντιπροσωπευτικός των χειμάρρων της λεκάνης των Σερρών (κάτω ρου Στρυμόνα). Στους χειμάρρους αυτούς από το 1930 εφαρμόστηκε ένα φιλόδοξο έργο απόσβεσης με την εφαρμογή του κλασικού δασοτεχνικού συστήματος διευθέτησης. Μεταξύ των χειμάρρων που η διευθέτησή τους τέθηκε σε πρώτη προτεραιότητα ήταν και ο χείμαρρος Αγίου Γεωργίου ή Ελαιώνα. Τα έργα διευθέτησης στο χείμαρρο άρχισαν το 1936 με ενδιάμεσες διακοπές κατά τα έτη 1940-1946 και 1953-1966 και ολοκληρώθηκαν το 1967. Περιλαμβάνουν ένα πλέγμα τεχνικών κατασκευών στις κεντρικές κοίτες, φυτοτεχνικών έργων στις χαραδρώσεις και αναδασώσεις στη λεκάνη απορροής.

Τα φράγματα σταθεροποίησης και συγκράτησης φερτών υλών μέσα στις κεντρικές κοίτες, δημιούργησαν με τις προσχώσεις ευνοϊκές συνθήκες για τη φυσική εγκατάσταση πλούσιας παρόχθιας βλάστησης με είδη πλατάνου, λεύκης, ιτιάς και σκλήθρου. Η πιο σημαντική αλλαγή στη βλάστηση της περιοχής, ήταν οι τεχνητές αναδασώσεις κυρίως με τραχεία πεύκη. Οι αναδασώσεις άρχισαν το 1947, συνεχίστηκαν μέχρι το 1952 και άλλαξαν εντελώς τη φυσιογνωμία της περιοχής. Κατά την ίδια περίοδο οι κοινωνικοοικονομικές μεταβολές επέφεραν σημαντικές αλλαγές στη χρήση της γεωργικής γης και των βοσκοτόπων. Παρατηρήθηκε μια αύξηση στις δενδροκαλλιέργειες (ελιάς, αμυγδαλιάς, κλπ) ενώ οριακές για γεωργική χρήση εκτάσεις εγκαταλείφθηκαν και χρησιμοποιούνται σήμερα ως βοσκότοποι.

Ο χείμαρρος Ελαιώνα αποτελεί μια παραλλαγή της κατηγορίας των χειμάρρων των λοφωδών και ημιορεινών περιοχών με χαρακτηριστικά διάρθρωσης των χειμάρρων των ορεινών και πολύ ορεινών περιοχών (Κωτούλας 1985). Το ελάχιστο υψόμετρο είναι 69 m, το μέγιστο 1026 m και το μέσο υψόμετρο 436 m. Το γεωλογικό υπόβαθρο δομείται από ιζηματογενείς και προσχωσιγενείς πετρολογικούς σχηματισμούς σε ποσοστό 69,5% (Γεωλογικός χάρτης ΓΜΕ φύλλο Σέρρες 1985). Έχει λεκάνη απορροής με συνολική έκταση 23,585 km<sup>2</sup> που αποτελείται από δύο κύριες υπολεκάνες: α) την υπολεκάνη του κλάδου «Ελαιώνα – Μαρμαρά» (υπολεκάνη 1) με έκταση 16,028 km<sup>2</sup>, ποσοστό δάσωσης 37% και ποσοστό ιζηματογενών και προσχωσιγενών γεωλογικών σχηματισμών 64% και β) την

υπολεκάνη «Κουκλίστικα – Αμπέλια» (υπολεκάνη 2) με έκταση 7,017 km<sup>2</sup>, ποσοστό δάσωσης είναι 26,7% και ποσοστό ιζηματογενών και προσχωσιγενών σχηματισμών 79,7%.

Σύμφωνα με τον Μαυρομάτη (1980) το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται υπομεσογειακό με 22,3 βιολογικά ξηρές ημέρες (Ντάφης, 1986). Ο πλησιέστερος στο κέντρο της λεκάνης απορροής του χειμάρρου μετεωρολογικός σταθμός, είναι ο δασικός μετεωρολογικός σταθμός της Χρυσοπηγής του ΕΘΙΑΓΕ, σε υπερθαλάσσιο υψόμετρο 605 m. Όπως προκύπτουν από τα δεδομένα του σταθμού το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 564 mm. και η μέση ετήσια θερμοκρασία 12,9 °C. Η ξηροθερμική περίοδος είναι διάρκειας περίπου 2 μηνών από τα μέσα Ιουλίου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Η μελέτη των μορφολογικών και φυσιογραφικών χαρακτηριστικών με τη χρήση των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS) είναι πιο εύκολη και τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ακριβέστερα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι εφαρμογές, ArcGIS και MapInfo Professional.

Ως πηγές των χωρικών και περιγραφικών δεδομένων στις χωρικές αναλύσεις, κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας, χρησιμοποιήθηκαν: α) χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, κλίμακας 1:5.000, β) ο Γεωλογικός χάρτης Σερρών του ΙΓΜΕ, κλίμακας 1:50.000, γ) ψηφιακοί ορθοφωτοχάρτες του ΟΚΧΕ της περιοχής Σερρών από παγχρωματικές αεροφωτογραφίες με χωρική ανάλυση 1m. και δ) Ζεύγος αεροφωτογραφιών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, κλίμακας 1:40.000 λήψης 1945. Με βάση τους ψηφιοποιημένους αναλογικούς χάρτες και τις ψηφιακές εικόνες παρήχθησαν πρωτογενώς τα θεματικά επίπεδα διανυσματικής μορφής (ισοϋψείς, υψόμετρα, υδρογραφικό δίκτυο, γεωλογικοί σχηματισμοί) και δευτερογενώς το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (ΨΥΜΕ ή DEM). Με βάση τις αεροφωτογραφίες του 1945 και το ΨΥΜΕ παρήχθησαν με το ERDAS Imagine οι ψηφιακές ορθοεικόνες της περιοχής που χρησιμοποιήθηκαν στη χαρτογράφηση των χρήσεων γης της λεκάνης όπως αυτές εμφανίζονταν το 1945.

Λόγω έλλειψης υδρομετρήσεων, επιλέχθηκαν υδρολογικά μοντέλα που είναι δυνατόν να προσαρμοστούν στις ιδιαίτερες συνθήκες του χειμάρρου και στα οποία οι παράμετροι είναι μετρήσιμα μεγέθη ή δεν απαιτούν οπωσδήποτε την προσαρμογή τους με βαθμονόμηση. Ως κατάλληλο εργαλείο επιλέχθηκε το HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) που περιλαμβάνει ένα σύνολο από μεθόδους προσομοίωσης (μοντέλα) βροχής – απορροής και διόδευσης σε φυσικά ή σε τεχνητά συστήματα.

Για το σκοπό αυτό στήθηκαν στο HEC-HMS τρία ημικατανεμημένα μοντέλα λεκάνης απορροής, ένα για την μορφή που εμφάνιζε η λεκάνη το 1945, ένα για την σημερινή κατάσταση και ένα για ένα υποθετικό σενάριο. Ως μοντέλο απωλειών (Loss Method) επιλέχθηκε το μοντέλο αριθμού καμπύλης της NRCS (SCS Curve Number). Ως μοντέλο μεταφοράς ή απορροής (Transform Method) επιλέχθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα της NRCS (SCS Unit Hydrograph). Μοντέλο βασικής απορροής (Baseflow Method) δεν επιλέχθηκε λόγω της ασήμαντης συνεισφοράς της στην πλημμυρική παροχή.

Η μέθοδος της αμερικάνικης Natural Resources Conservation Service (NRCS πρώην SCS) υπολογίζει το ύψος του περισεύματος βροχής και βασίζεται τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις (NRCS, 2010):

$$P_e = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} & P > I_a \\ 0 & P \leq I_a \end{cases} \quad \text{και} \quad S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad 3.1$$

Στις παραπάνω σχέσεις,  $P_e$  είναι το ενεργό ύψος βροχής σε μια δεδομένη χρονική στιγμή,  $P$  είναι το συνολικό ύψος βροχής στην ίδια χρονική στιγμή,  $I_a$  το αρχικό έλλειμμα (όταν δεν είναι γνωστό υπολογίζεται με την εμπειρική σχέση:  $I_a = 0.2 \cdot S$ ),  $S$  η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση. Η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση  $S$  υπολογίζεται με βάση τον αριθμό καμπύλης απορροής (CN) που παίρνει τιμές με βάση τον υδρολογικό τύπο του εδάφους (διηθητικότητα), την κάλυψη, τον τρόπο διαχείρισης της γης καθώς και την προηγούμενη κατάσταση απορροής Antecedent Runoff Condition (ARC). Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι απορροές για μέση υγρασιακή κατάσταση ARCI.

Για την εκτίμηση των ακραίων παροχών του χειμάρρου, χρησιμοποιήθηκαν οι εντάσεις βροχής για διάφορες περιόδους επαναφοράς, οι οποίες υπολογίστηκαν από τις όμβριες καμπύλες που καταρτίστηκαν για τον Μ. Σ. Χρυσοπηγής. Η ενιαία μαθηματική έκφραση των όμβριων καμπυλών δίνει την ένταση  $i$  βροχής ορισμένης διάρκειας  $d$  με περίοδο επαναφοράς  $T$ . Για κατανομή Gumbel μεγίστων τύπου I η ενιαία μαθηματική έκφραση είναι της παρακάτω μορφής (Κουτσογιάννης, 1997).

$$i = \frac{\lambda \psi - \lambda \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \quad 3.2$$

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $\eta$  και  $\theta$  γίνεται σε υπολογιστικό σύστημα με διαδικασία εξαντλητικών δοκιμών. Οι παράμετροι  $\lambda$  και  $\psi$  υπολογίζονται με τη μέθοδο των L-ροπών. Η διαδικασία κατάρτισης όμβριων καμπυλών υλοποιείται αυτόματα μέσα από το ειδικό λογισμικό «Υδρογνώμων» της ερευνητικής ομάδας «ITIA» του Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Κοζάνης και Μαρκόνης, 2009).

Με βάση τις όμβριες καμπύλες κατασκευάζεται ένα υποθετικό υετογράφημα το οποίο θεωρείται ότι έχει την δυσμενέστερη κατανομή για μια δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ κατά την οποία η συνολική διάρκεια της βροχής χωρίζεται σε μικρά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε στο καθένα να αντιστοιχεί ένα τμήμα του συνολικού ύψους βροχής και διατάσσονται κατά το δυνατόν συμμετρικά και σε φθίνουσα σειρά ύψους βροχής γύρω από την κεντρική τιμή, η οποία συμπίπτει με το μέγιστο τμηματικό ύψος βροχής. Έτσι επιλέγουμε καταιγίδες με διάρκεια 6 ώρες και περίοδο επαναφοράς 20, 100, 200 και 500 έτη.

Ο μετασχηματισμός του υετογραφήματος σε υδρογράφημα άμεσης απορροής έγινε με την μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Σε ρέματα όπου δεν υπάρχουν καταγραφές παροχών και αντίστοιχων βροχοπτώσεων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ένα συνθετικό υδρογράφημα από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Μια από τις πιο διαδεδομένες και καλά τεκμηριωμένες μεθόδους κατάρτισης συνθετικών υδρογραφημάτων είναι η μέθοδος του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος της NRCS. Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα παριστάνεται επίσης και από ένα ισοδύναμο τριγωνικό υδρογράφημα που περιγράφεται με τις παρακάτω εξισώσεις (NRCS, 2010):

$$Q_p = 0,208 \cdot \frac{h \cdot F}{T_p} \quad 3.3$$

Όπου:  $Q_p$  Παροχή αιχμής ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).  $F$  η έκταση της λεκάνης απορροής ( $\text{km}^2$ ).  $h$ : ύψος βροχής διάρκειας  $\Delta D$  ή το μοναδιαίο ύψος βροχής (ίσο με 10 mm).  $T_p$  ο χρόνος ανόδου (hr). Ο χρόνος ανόδου υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$T_p = \frac{\Delta D}{2} + T_L \quad 3.4$$

Όπου  $\Delta D$  η διάρκεια της βροχής (hr) και  $T_L$  είναι ο χρόνος επιβράδυνσης της λεκάνης απορροής, δηλαδή η χρονική διαφορά μεταξύ του κέντρου βάρους του υετογραφήματος και της αιχμής της απορροής. Ο χρόνος επιβράδυνσης είναι ίσος με  $T_L = 0,6 \cdot T_c$ . Όπου  $T_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής.

Η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης  $T_c$  είναι κρίσιμη και δεν είναι εύκολη, γιατί εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα ροής μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο. Επίσης η ταχύτητα ροής εξαρτάται και από το βαθμό πλήρωσης των κοιτών. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος συγκέντρωσης διαφέρει μεταξύ καταιγίδων διαφορετικής έντασης. Η πιο ακριβής μέθοδος υπολογισμού του χρόνου αυτού που λαμβάνει επιπλέον υπόψη και την παροχευτικότητα των κοιτών είναι αυτός που προτείνεται από την αμερικάνικη υπηρεσία NRCS σύμφωνα με την οποία ο χρόνος συγκέντρωσης είναι το άθροισμα τριών επιμέρους χρόνων (NRCS, 2010):

$$T_c = T_1 + T_2 + T_3 \quad 3.5$$

Όπου  $T_1$  είναι ο χρόνος ροής στη κεντρική κοίτη,  $T_2$  ο χρόνος της ρηχής απορροής σε μικρά ρυάκια και  $T_3$  ο χρόνος της απορροής πάνω στις επιφάνειες της λεκάνης. Ο χρόνος ροής  $T_1$  στην κοίτη μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο:

$$T_1 = \frac{L}{V} \quad 3.6$$

$L$ : το μήκος της συγκεντρωμένης ροής στην κοίτη και  $V$ : η ταχύτητα ροής. Η ταχύτητα ροής σε ανοιχτούς αγωγούς για σταθερή ομοιόμορφη ροή υπολογίζεται από τον τύπο των Manning-Strickler:

$$V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad 3.7$$

$R$ : η υδραυλική ακτίνα σε m ( $R = A/U$  όπου,  $A$ : υγρή επιφάνεια διατομής,  $U$ : βρεχόμενη περίμετρος)  $S$ : Κλίση της κοίτης σε m/m.  $n$ : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning που δίνεται από πίνακες (Κωτούλας 1986). Ο χρόνος ροής στην κεντρική κοίτη υπολογίζεται για κάθε τμήμα της κοίτης με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ο χρόνος  $T_1$  είναι το άθροισμα των χρόνων σε κάθε τμήμα. Από τον παραπάνω τύπο γίνεται αντιληπτό ότι η ταχύτητα του νερού σε μια δεδομένη διατομή της κοίτης εξαρτάται από τον βαθμό πλήρωσής της, δηλαδή από το βάθος ροής που αυξάνεται με την παροχή. Επομένως στον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης τίθεται και το πρόβλημα της επιλογής της κατάλληλης αντιπροσωπευτικής παροχής. Ως τέτοια κατάλληλη παροχή παίρνεται αυτή που προκύπτει από καταιγίδες διάρκειας 24 ωρών με περίοδο επαναφοράς τα 2 έτη (NRCS, 2010). Η ταχύτητα  $V$  για κοίτες με πλάτος πολύ μεγαλύτερο από το βάθος ροής υπολογίζεται με καλή προσέγγιση με τον παρακάτω τύπο:

$$V = \left[ \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{Q}{b} \right)^{2/3} \cdot S^{1/2} \right]^{3/5} \quad 3.8$$

Όπου  $b$  το πλάτος της κοίτης (m) και  $Q$  η παροχή ( $m^3/s$ ). Το πλάτος μετρείται εύκολα στις αεροφωτογραφίες και η παροχή υπολογίζεται για το τμήμα της λεκάνης άνωθεν της διατομής.

Ο χρόνος  $T_2$  της ρηχής απορροής υπολογίζεται σε δευτερόλεπτα με τον παρακάτω τύπο που προκύπτει από τον τύπο του Manning:

$$T_2 = \frac{L}{V} = \frac{L}{a \cdot \sqrt{S}} \quad 3.9$$

Όπου:  $L$  το μήκος (m) της ρηχής ροής,  $V$  η ταχύτητα,  $S$  η κλίση (m/m) και  $a$  ένας συντελεστής εξαρτημένος από το είδος της ροής (βάθος ροής και είδος επιφάνειας) σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα της NRCS (2010):

**Πίνακας 1: Συντελεστής  $a$**

<i>Είδος επιφάνειας</i>	<i><math>a</math></i>
Λιθόστρωτα και μικρές χαραδρώσεις	6,1960
Νεροσυρμές καλυμμένες με ποώδη βλάστηση	4,9178
Ακαλλιέργητα γυμνά εδάφη	3,0373
Καλλιεργούμενοι αγροί	2,6707
Λιβάδια με χαμηλή ποώδη βλάστηση	2,1220
Ελάχιστη άροση, καλλιέργεια σε βαθμίδες ή λωρίδες και δασώδεις εκτάσεις	1,5375
Δάση με παχύ ξηροτάπητα και λειμώνες	0,7669

Ο χρόνος  $T_3$  της συγκέντρωσης του νερού (σε ώρες) πάνω στις επιφάνειες της λεκάνης υπολογίζεται για αποστάσεις μέχρι 100m από την παρακάτω απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης κινηματικού κύματος του Manning που αναπτύχθηκε από τους Welle και Woodward (1986), (NRCS, 2010):

$$T_3 = \frac{0,0913 \cdot (n \cdot L)^{0,8}}{\sqrt{P_2} \cdot S^{0,4}} \quad 3.10$$

Όπου  $n$  συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους,  $L$  το μήκος (m) της ροής στις επιφάνειες της λεκάνης το οποίο είναι μικρό (10-100 m).  $P_2$  ύψος βροχής (mm) 24ώρου με χρόνο επαναφοράς 2 έτη.  $S$  κλίση (m/m) της επιφάνειας του εδάφους.

Για την διόδευση διαμέσου των κοιτών επιλέχθηκε το μοντέλο Muskingum-Cunge. Το μοντέλο συνδυάζει την εξίσωση συνέχειας και την απλοποιημένη μορφή (προσέγγιση διάχυσης κύματος) της εξίσωσης ορμής κατά την οποία παραλείπονται οι δυνάμεις αδράνειας και βασίζεται στην επίλυση των παρακάτω εξισώσεων με χρονικό βήμα  $\Delta t$  και χωρικό βήμα  $\Delta x$  κατά μήκος του αγωγού (USACE, 1994):

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 I_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n + C_4 (q_L \Delta x) \quad 3.11$$

$Q_{j+1}^{n+1}$  και  $Q_j^{n+1}$  οι παροχές σε χρόνο  $n+1$  και αποστάσεις  $j+1$  και  $j$  αντίστοιχα,  $Q_j^n$  και  $Q_{j+1}^n$  οι παροχές σε χρόνο  $n$  και αποστάσεις  $j$  και  $j+1$  αντίστοιχα,  $q_L$  η πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους αγωγού.

$$C_1 = \left( \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right), C_2 = \left( \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right) \quad 3.12$$

$$C_3 = \left( \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \right), C_4 = \left( \frac{2\Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \right)$$

Οι παράμετροι  $K$  και  $X$  δίνονται από τις εξισώσεις (USACE 1994):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{και} \quad X = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{Q}{B \cdot S_0 \cdot c \cdot \Delta x} \right) \quad 3.13$$

$c$  η ταχύτητα μετάδοσης κύματος (celerity),  $Q$  η παροχή,  $B$  το πλάτος επιφάνειας της διατομής,  $S_0$  η κλίση της κοίτης.

Οι συντελεστές  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  και  $C_4$  υπολογίζονται για κάθε χρονικό  $\Delta t$  και χωρικό  $\Delta x$  βήμα. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου Muskingum-Cunge είναι:

- α) Ο συντελεστής τραχύτητας  $n$  του Manning,
- β) η αντιπροσωπευτική διατομή του αγωγού (τριγωνική, ορθογωνική, τραπεζοειδής, κυκλική και 8 σημείων),
- γ) το μήκος  $L$  και η κλίση  $S_0$  του αγωγού.

Εάν τα παραπάνω χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται έντονα κατά μήκος του αγωγού τότε τον χωρίζουμε σε περισσότερα τμήματα με κατά το δυνατό ομοιόμορφα χαρακτηριστικά.

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Με βάση τους ψηφιοποιημένους χάρτες και τις ψηφιακές εικόνες παρήχθησαν αρχικά τα θεματικά επίπεδα διανυσματικής μορφής:

- Ισοϋψείς, σημειακά υψόμετρα, υδρογραφικό δίκτυο από τους χάρτες της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:5000.
- Γεωλογικοί σχηματισμοί από τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ.
- Χρήσεις - καλύψεις γης από τους ψηφιακούς ορθοφωτοχάρτες του ΟΚΧΕ και τις ορθοεικόνες του 1945.

Με βάση τις ισοϋψείς τα σημειακά υψόμετρα και το υδρογραφικό δίκτυο, δημιουργήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (ΨΥΜΕ) που αποτέλεσε τη βάση από το οποίο προέκυψαν με εφαρμογή χωρικών αναλύσεων ένα σύνολο από δευτερογενή θεματικά επίπεδα ψηφιδωτής (raster) και διανυσματικής (vector) δομής (Hutchinson 1989, ESRI 2007).

Η υποδιαίρεση της λεκάνης απορροής του χειμάρρου έγινε ημιαυτόματα με βάση το ΨΥΜΕ εφαρμόζοντας τις διαδικασίες του Arc Hydro Tools (ESRI 2009). Όλη η λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ελαιώνα υποδιαιρέθηκε σε 13 τμήματα (υπολεκάνες) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

Η διάκριση των καλύψεων γης για την σημερινή κατάσταση της λεκάνης βασίστηκε στον ψηφιακό ορθοφωτοχάρτη του ΟΚΧΕ ενώ για το 1945 σε ορθοεικόνα που παρήχθη με βάση τις αεροφωτογραφίες λήψης του 1945 και το ΨΥΜΕ. Οι καλύψεις γης κωδικοποιήθηκαν σύμφωνα με τον Πίνακα 2 και παρήχθησαν τα δύο θεματικά επίπεδα τύπου raster της Εικόνας 1.

Η εφαρμογή του μοντέλου απωλειών (Loss Method) της NRCS (SCS Curve Number) απαιτεί την κατάταξη των εδαφών σε υδρολογικούς τύπους (A,B,C και D) ανάλογα με τη διαπερατότητα τους. Για το σκοπό αυτό στις ΗΠΑ τα εδάφη της χώρας έχουν ταξινομηθεί σε

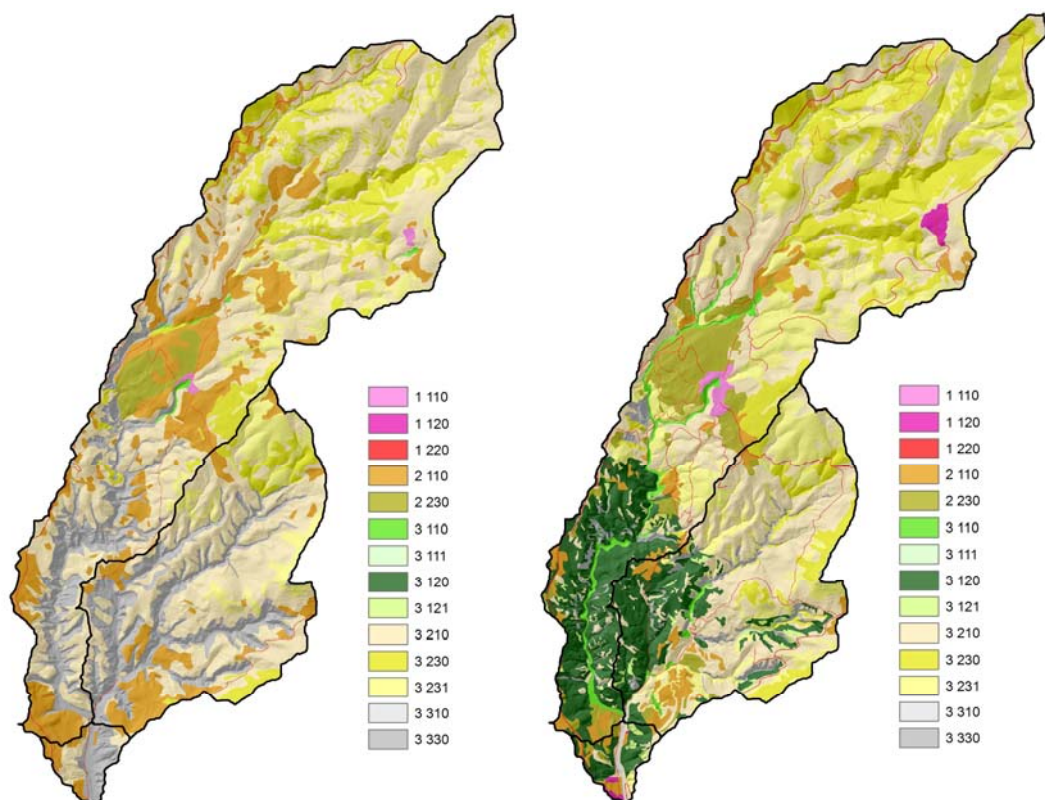
υδρολογικούς τύπους που διευκολύνουν την εφαρμογή της μεθόδου. Στην χώρα μας δεν υπάρχει αντίστοιχη ταξινόμηση και αναγκαστικά καταφεύγουμε στην κατάταξη των εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητα τους παίρνοντας στοιχεία από εδαφολογικούς χάρτες. Όταν δεν υπάρχουν ούτε εδαφολογικοί χάρτες, που είναι και ο κανόνας για τις ορεινές λεκάνες, τότε αναγκαστικά η ταξινόμηση βασίζεται στους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ. Αξιοποιώντας και τις πληροφορίες που παρέχονται από την Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων (European Soil Database, 2005), το χάρτη εδαφικών ενώσεων της Ελλάδας της Εθνικής Επιτροπής κατά της ερημοποίησης, τη σχετική βιβλιογραφία (Παπαμίχος 1985, Μπαλούτσος κ.α. 2000) και τις παρατηρήσεις πεδίου είναι δυνατή η κατάταξη των εδαφών στους υδρολογικούς τύπους της NRCS με κάποια σχετική ακρίβεια. Με βάση λοιπόν τον γεωλογικό χάρτη και την ταξινόμηση του Πίνακα 3 προέκυψε το θεματικό επίπεδο τύπου raster με τους υδρολογικούς τύπους των εδαφών της λεκάνης απορροής.

Σημειώνεται ότι, τα εδάφη που αναπτύσσονται στο μανδύα αποσάθρωσης των γρανιτικών και των συμπαγών κροκαλοπαγών πετρωμάτων είναι κατά βάση ελαφρά έως μέτρια με σχετικά υψηλό έως μέτριο ρυθμό διήθησης. Εντούτοις το δυναμικό επιφανειακής απορροής τους εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το βάθος τους γιατί τα γρανιτικά και τα συμπαγή κροκαλοπαγή πετρώματα είναι αδιαπέρατα από το νερό. Έτσι στην περιοχή μας τα εδάφη των σχηματισμών αυτών κατατάσσονται στην κατηγορία C λόγω της έντονης υποβάθμισης και του μικρού τους βάθους.

**Πίνακας 2: Μεταβολές στις χρήσεις - καλύψεις γης**

Κωδικός	Χρήσεις - Καλύψεις Γης	Ποσοστό	
		1945	Σήμερα
1110	Οικισμοί με πυκνή δόμηση	0,2%	0,5%
1120	Οικισμοί με αραιά δόμηση		0,5%
1220	Δρόμοι	0,5%	1,6%
2110	Γεωργικές καλλιέργειες (σιτηρά)	15,0%	4,6%
2230	Ελαιώνες - οπωρώνες	1,9%	5,6%
3210	Χορτολίβαδα - Βοσκές	46,1%	31,8%
3110	Φυλλοβόλα Πλατύφυλλα (πυκνό)	0,2%	1,8%
3111	Φυλλοβόλα Πλατύφυλλα (αραιό)		0,1%
3120	Τραχεία Πεύκη (πυκνό)		14,0%
3121	Τραχεία Πεύκη (αραιό)		0,7%
3230	Πρίνος - φυλλοβόλοι θάμνοι (πυκνό)	12,3%	18,3%
3231	Πρίνος - φυλλοβόλοι θάμνοι (αραιό)	8,7%	18,1%
3310	Αμμώδεις εκτάσεις (κοίτες ρεμάτων)	1,0%	0,2%
3330	Γυμνά (βράχια και διαβρώσεις)	14,1%	2,4%

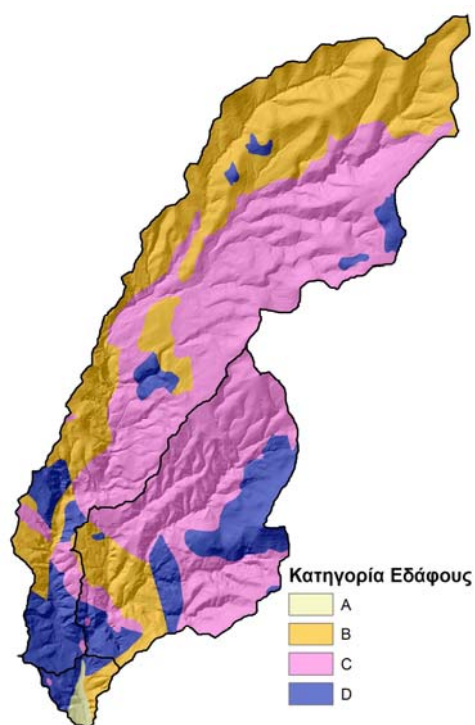




**Εικόνα 1:** Καλύψεις γης το 1945 (αριστερά) και σήμερα (δεξιά)

**Πίνακας 3:** Αντιστοίχιση πετρολογικών σχηματισμών - εδαφών

Κωδικός Γεωλ. Χάρτη	Πετρολογικός σχηματισμός	Ύδρ/κή κατηγ. εδαφών
al	Προσχώσεις κοιλάδων	A
Pt.t <sub>1</sub>	Ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων	B
Pt.t <sub>3</sub>	Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων	A
mr	Μάρμαρα	C
ol	Ολισθόλιθοι και ολισθοστρώματα	C
μν	Χαλαζιακός Μονζονίτης - Γρανίτης	C
Pt.l.s	Ποταμοχειμάρια αποθέσεις	B
Ng.c <sub>1</sub>	Λιμνοχερσαίοι σχηματισμοί	B
Ng.l <sub>1</sub>	Ανώτερα λεπτομερή λιγνιτοφόρα στρώματα	D
Ng.s	Θαλάσσια στρώματα	C
Ng.tv-mk	Λιμνοχειμάρια σχηματισμοί - μάργες και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι	D
Ng <sub>1</sub>	Συμπαγή κροκαλοπαγή	C
Ng <sub>2</sub>	Αποθέσεις κροκαλοπαγών.	B

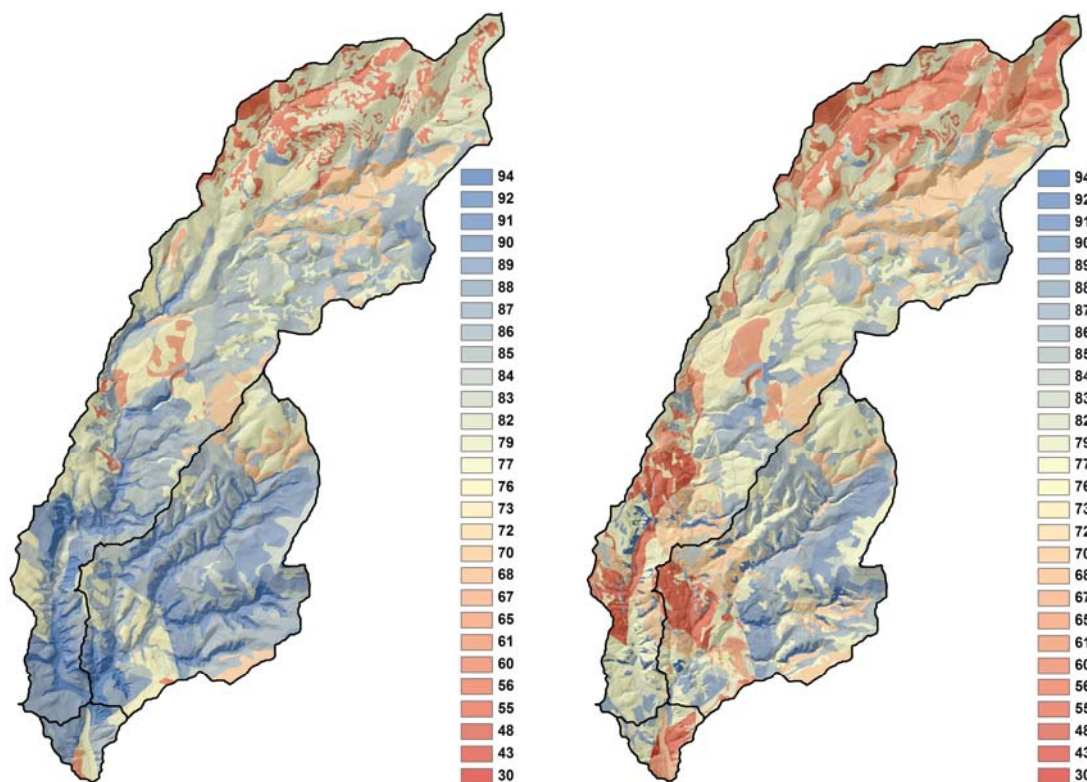


**Εικόνα 2:**  
Χάρτης υδρολογικών κατηγοριών  
εδαφών

Σε κάθε σύμπλοκο εδάφους – φυτοκάλυψης της λεκάνης απορροής αντιστοιχεί ένας αριθμός καμπύλης απορροής της NRCS. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί εδάφους-κάλυψης για την λεκάνη απορροής καταγράφονται στον Πίνακα 4. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 4 και τον συνδυασμό των raster φυτοκάλυψης (Εικόνα 1) και υδρολογικών τύπων εδάφους (Εικόνα 2) στο ArcGIS προέκυψαν δύο νέα raster με τους αριθμούς καμπύλης απορροής CN (Εικόνα 3).

**Πίνακας 4:** Σύμπλοκα εδάφους-κάλυψης

Κωδικός κάλυψης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
1110	77	85	90	92
1120	61	75	83	87
1220	72	82	87	89
2110	65	76	84	88
2230	43	65	76	82
3210	68	79	86	89
3110	36	60	73	79
3111	57	73	82	86
3120	30	55	70	77
3121	43	65	76	82
3230	35	56	70	77
3231	48	67	77	83
3310	68	79	86	89
3330	77	86	91	94



**Εικόνα 3:** Κατανομή αριθμών καμπύλης το 1945 (αριστερά) και σήμερα (δεξιά)

Το έτος 1945, τους μικρότερους αριθμούς καμπύλης απορροής παρατηρούμε στο ανώτερο τμήμα της λεκάνης απορροής, που κατά κύριο λόγο οφείλεται στο γεωλογικό υπόβαθρο (ποταμοχειμάρια αποθέσεις και ασύνδετες αποθέσεις κροκαλοπαγών) και κατά δεύτερο λόγο στην πενιχρή έστω δασική βλάστηση που κάλυπτε το ανώτερο τμήμα, σε αντίθεση με την παντελή έλλειψη της στο κατώτερο τμήμα. Οι διαφορές στον αριθμό καμπύλης μεταξύ της σημερινής κατάστασης και του 1945, οφείλονται, στην πυκνωση της δασικής βλάστησης (λόγω μείωσης της βοσκής και της καυσοξύλευσης) στο ανώτερο τμήμα, στην εγκατάλειψη των αγρών και στην αύξηση των δενδροκαλλιεργειών (ελιές κλπ) στο κεντρικό τμήμα και στις αναδασώσεις που έγιναν στα πλαίσια των υδρονομικών έργων στο κατώτερο τμήμα. Οι διαφορές είναι μεγαλύτερες στο κατώτερο δυτικό τμήμα (Πίνακας 5, υπολεκάνες, 0, 10, 20, 21 και 220).

Για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν οι σταθμισμένοι αριθμοί καμπύλης απορροής χρησιμοποιώντας ως συντελεστές βαρύτητας τα ποσοστά στη συνολική έκταση που καταλαμβάνει κάθε αριθμός καμπύλης (Πίνακας 5).

Για την εκτίμηση των ακραίων παροχών του χειμάρρου, για διάφορες περιόδους επαναφοράς  $T$ , κατασκευάστηκαν από τις όμβριες καμπύλες του Μ.Σ. Χρυσοπηγής με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ υετογραφήματα σχεδιασμού με αντίστοιχες περιόδους επαναφοράς.

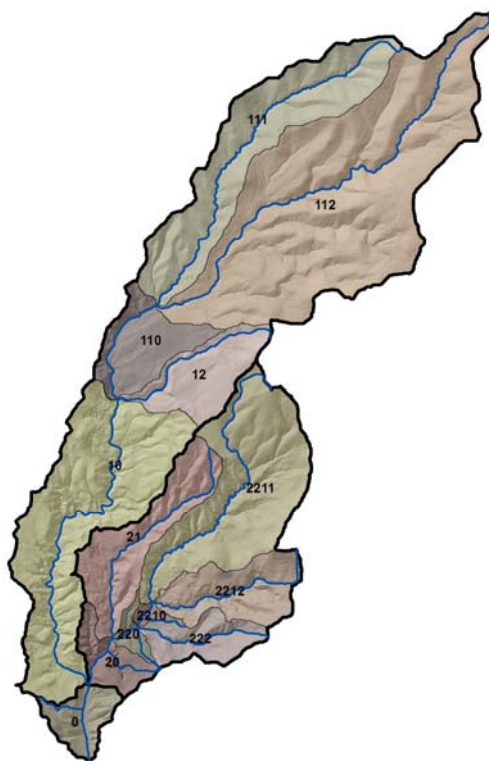
Για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών, χρησιμοποιήθηκε ένα ενοποιημένο δείγμα που αποτελείται από πέντε χρονοσειρές με μέγιστα ύψη βροχής διάρκειας μικρότερης των 24 ωρών που προέκυψαν από ωριαίες παρατηρήσεις του βροχογράφου αλλά με μικρό μήκος (για 8 μόλις έτη) και μια χρονοσειρά με μέγιστα διάρκειας 24 ωρών με μεγαλύτερο μήκος (26 έτη). Όλες οι χρονοσειρές χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των παραμέτρων  $\eta$  και  $\theta$  του παρανομαστή της Εξίσωσης (3.2) ενώ η χρονοσειρά διάρκειας 24 ωρών χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής  $\lambda$  και  $\psi$  λόγω του πολύ μεγαλύτερου μήκους της. Η ανάλυση των χρονοσειρών και ο υπολογισμός των παραμέτρων έγινε με την βοήθεια του «Υδρογνώμονα» (Κοζάνης και Μαρκόνης 2009). Παρακάτω δίνεται η ενιαία μαθηματική έκφραση των όμβριων καμπυλών με την οποία υπολογίζεται η ένταση  $i$  βροχής ορισμένης διάρκειας  $d$  και περιόδου επαναφοράς  $T$ .

$$i = \frac{21,75 - 6,25 \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + 0,033)^{0,818}} \quad 4.1$$

Βασική παράμετρος της μεθόδου του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος της NRCS είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής. Για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν οι χρόνοι συγκέντρωσης ως αθροίσματα των τριών επιμέρους χρόνων σύμφωνα με τις Εξισώσεις (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) και (3.10) και οι χρόνοι επιβράδυνσης από την σχέση  $T_L = 0,6 \cdot T_c$ .

Τα μήκη και οι κλίσεις των τμημάτων της συνολικής διαδρομής για κάθε υπολεκάνη βρέθηκε με την βοήθεια του ArcGIS. Στις ψηφιακές ορθοεικόνες εντοπίστηκαν τα τμήματα της διαδρομής που διανύονται σε επιφάνειες εκτός ρεμάτων, στις μισγάγγειες και στις κοίτες. Υπολογίστηκαν τα μήκη και τα υψόμετρα μεταξύ των κόμβων της πολυγωνικής κάθε διαδρομής και τέλος το συνολικό μήκος και η μέση κλίση κάθε διαδρομής. Για κάθε τμήμα κοίτης εκτιμήθηκε ένα αντιπροσωπευτικό - μέσο πλάτος και ένας αντιπροσωπευτικός συντελεστής του Manning (Barnes 1967, Arcement & Schneider 1984). Οι εκτιμήσεις βασίστηκαν σε μετρήσεις επί των ψηφιακών εικόνων σε συνδυασμό με επιτόπιες παρατηρήσεις. Οι κλίσεις κάθε τμήματος κοίτης υπολογίστηκε από το ΨΥΜΕ. Για τα τμήματα της κεντρικής κοίτης, όπου εφαρμόστηκε διόδευση, οι κλίσεις διορθώθηκαν με μετρήσεις που λήφθηκαν πίσω από τα υφιστάμενα φράγματα και είναι ο μέσος όρος των

Στο HEC-HMS κατασκευάστηκαν τρία υδρολογικά μοντέλα, ένα για την κατάσταση της λεκάνης το 1945, ένα για την σημερινή και ένα τρίτο για ένα υποθετικό σενάριο το οποίο προέβλεπε την απομάκρυνση της βλάστησης από την κεντρική κοίτη της λεκάνης απορροής 1 σε μήκος 6.664 m. Τα υδρολογικά μοντέλα ήταν ημικατανεμημένα και συγκροτήθηκαν από τρεις τύπους βασικών υδρολογικών στοιχείων (hydrologic elements), υπολεκάνες (Basins), κοίτες (Reaches) και συμβολές (Junctions) όπως στο σχήμα της Εικόνας 5 (Scharffenberg & Fleming, 2008).



**Εικόνα 5:** Μοντέλο της λεκάνης απορροής στο HEC-HMS

Οι τιμές των παραμέτρων των μοντέλων απωλειών και άμεσης απορροής φαίνονται στον Πίνακα 5 ενώ στον Πίνακα 6 οι παράμετροι διόδουσης. Επίσης εισήχθησαν τέσσερα υετογραφήματα σχεδιασμού διάρκειας 6 ωρών για περιόδους επαναφοράς 20, 100, 200 και 500 έτη με μορφή πίνακα αθροιστικών τιμών βροχής και χρονικό βήμα 3 λεπτών. Τα ύψη βροχής για εξάωρη διάρκεια υπολογίζονται αντίστοιχα σε 56, 70, 76 και 84 mm για κάθε μία από τις τέσσερεις περιόδους επαναφοράς  $T$ .

**Πίνακας 5:** Παράμετροι υπολεκανών

Υπο- λεκάνη	Έκταση km <sup>2</sup>	Χρόνος επιβράδυνσης (min)			Αριθμός καμπύλης CN		
		1945	Σήμερα	Σενάριο	1945	Σήμερα	Σενάριο
0	0,540	13,0	22,2	22,2	84,1	70,9	70,9
10	3,948	29,6	43,1	29,5	85,8	74,5	74,5
110	1,046	22,1	24,8	23,0	78,0	74,9	74,9
111	2,874	34,0	36,2	36,2	72,8	69,6	69,6
112	7,062	34,9	39,5	39,5	78,5	74,5	74,5
12	1,098	20,2	22,4	22,4	80,2	77,9	77,9
20	0,521	12,7	13,6	13,6	88,2	80,4	80,4
21	1,467	21,1	22,7	22,7	85,5	73,2	73,2
220	0,181	10,1	10,5	10,5	81,4	74,2	74,2
2210	0,098	9,1	9,1	9,1	83,3	79,3	79,3
2211	2,929	25,1	28,1	28,1	84,2	81,9	81,9
2212	1,126	15,4	16,8	16,8	88,3	83,0	83,0
222	0,694	15,8	17,8	17,8	82,7	78,7	78,7

**Πίνακας 6:** Τιμές παραμέτρων διόδευσης

Κοίτη	L	1945				Σήμερα				Σενάριο			
		S	n	W	XH:1V	S	n	W	XH:1V	S	n	W	XH:1V
I.0	953	0,022	0,030	25	1,5	0,015	0,030	20	1,5	0,015	0,030	20	1,5
I.1_L	3620	0,022	0,032	8	5	0,022	0,085	3	10	0,022	0,032	8	5
I.1_U	1481	0,038	0,035	7	5	0,038	0,070	7	5	0,038	0,035	7	5
I.11_L	1153	0,038	0,040	5	3	0,038	0,070	5	3	0,038	0,040	5	3
I.11_U	410	0,103	0,040	4	2	0,103	0,060	4	2	0,103	0,040	4	2
II.2	684	0,035	0,030	20	1,5	0,020	0,030	15	1,5	0,020	0,030	15	1,5
II.22	363	0,035	0,032	15	1,5	0,035	0,032	15	1,5	0,035	0,032	15	1,5
II.221	399	0,037	0,032	8	1	0,037	0,032	8	1	0,037	0,032	8	1

S=κλίση, n=συντελ. Manning, W=πλάτος κοίτης, XH:1V=κλίση πρανών

Οι κλίσεις των πρανών της κοίτης για την σημερινή κατάσταση μετρήθηκαν σε αντιπροσωπευτικές θέσεις ενώ για το 1945 εκτιμήθηκαν ως πιο απότομες. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται με την μορφή που εισάγονται στο HEC-HMS ως XH:1V, όπου X η οριζόντια απόσταση (H) ανά μονάδα (1m) κατακόρυφης απόστασης (V).

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων στο HEC-HMS παίρνονται τα υδρογραφήματα για κάθε υπολεκάνη, συμβολή και διόδευση σε ρέμα, ενώ σε μορφή πινάκων οι παροχές σε διάφορους χρόνους και οι συνολικοί όγκοι της άμεσης απορροής.

Τα αποτελέσματα είναι θεωρητικά και ισχύουν κάτω από κάποιες εξαιρετικές συνθήκες που θεωρούνται και οι δυσμενέστερες:

1. Οι καταγίδες που εξετάζονται για διάφορους χρόνους επαναφοράς έχουν την δυσμενέστερη χρονική κατανομή.
2. Κάθε καταγίδα καλύπτει ταυτόχρονα όλη την έκταση της λεκάνης απορροής.
3. Η υγρασιακή κατάσταση των εδαφών της λεκάνης απορροής (μέση, ARCI) είναι η ίδια σε όλη την έκτασή της.



Στη παρούσα έρευνα μελετήθηκαν κυρίως τα υδρογραφήματα που προκύπτουν από τις δύο κύριες υπολεκάνες 1 και 2 καθώς και στην έξοδο της λεκάνης απορροής του χειμάρρου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 και στον Πίνακα 7 παρατηρούνται θεαματικές διαφορές στα υδρογραφήματα που προκύπτουν για την κατάσταση του 1945, την παρούσα και το υποθετικό σενάριο.

Για την κατάσταση της λεκάνης απορροής το 1945, το μοντέλο δίνει για όλες τις περιόδους επαναφοράς παροχές αιχμής σχεδόν διπλάσιες (82,6, 134,9, 159,3 και 193 m<sup>3</sup>/s) από αυτές της παρούσας κατάστασης (40,1, 66,4, 81,3 και 102,4 m<sup>3</sup>/s). Επίσης το υδρογράφημα σήμερα φαίνεται να έχει δύο αιχμές ενώ αυτό του 1945 μια, που οφείλεται στην αύξηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ των αιχμών των δύο υπολεκανών 1 και 2 κατά μισή ώρα περίπου.

Η μεγάλη μείωση των παροχών στην έξοδο της λεκάνης σε σχέση με το 1945 οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους: α) στην τεχνητή και φυσική αύξηση της δασοκάλυψης λόγω των έργων δασοτεχνικής διευθέτησης και των αλλαγών χρήσης των εδαφών της λεκάνης όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 και β) στην αύξηση του βαθμού παρεμπόδισης της ροής (τραχύτητα) στις κοίτες, που οφείλεται στην πυκνή φυσική βλάστηση που αναπτύχθηκε πάνω στις προσχώσεις των φραγμάτων διευθέτησης.

Οι μεταβολές στους όγκους της απορροής εκφράζουν την επίδραση των αλλαγών στις χρήσεις – καλύψεις γης που συντελέστηκαν στη λεκάνη απορροής από το 1945 μέχρι σήμερα. Για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς (20, 100, 200 και 500 έτη) τα μοντέλα δίνουν μειώσεις της τάξης του -33%, -28%, -26% και -24% αντίστοιχα, δηλαδή μεγαλύτερες για τις μικρότερες περιόδους επαναφοράς. Οι συντελεστές απορροής μειώθηκαν από 0,35, 0,40, 0,42 και 0,48 σε 0,20, 0,27, 0,30 και 0,33 αντίστοιχα.

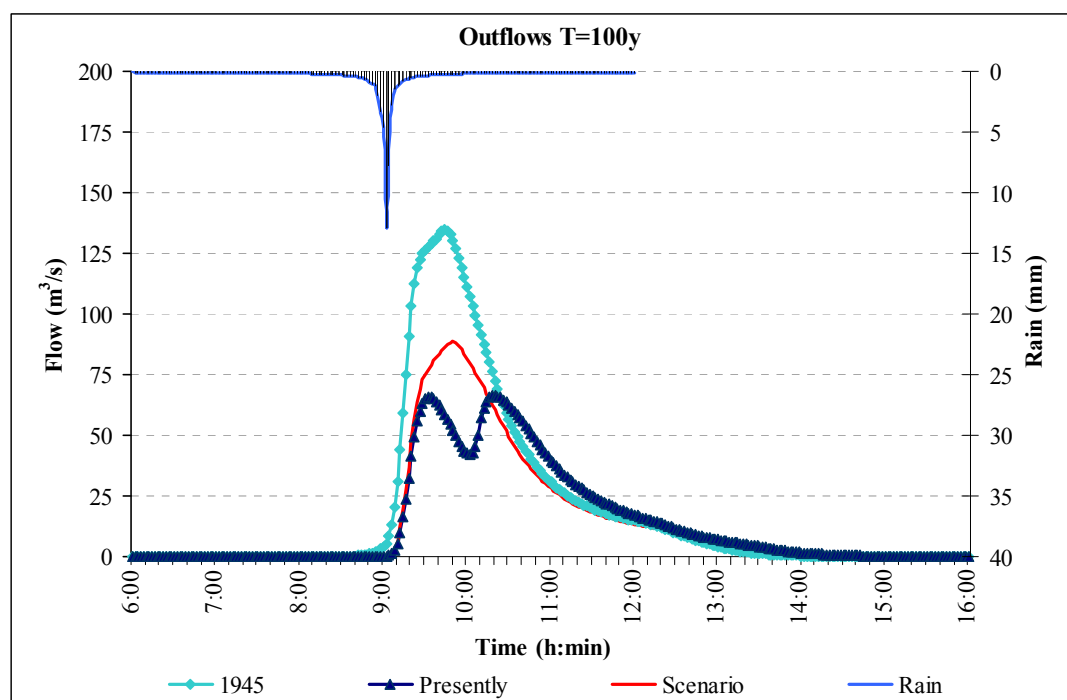
Οι μεταβολές στις παροχές αιχμής και στη μορφή των υδρογραφημάτων, εκτός από τις αλλαγές στις χρήσεις γης οφείλονται και στις αλλαγές των συνθηκών ροής μέσα στις κοίτες. Αυτό αποδεικνύεται από το υποθετικό σενάριο όπου οι μόνες αλλαγές που έγιναν στις συνθήκες που επικρατούν σήμερα, ήταν οι συντελεστές τραχύτητας του Manning στο μοντέλο διόδευσης Muskingum-Cunge. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σύγκλιση μεταξύ των αιχμών των υδρογραφημάτων που προκύπτουν από τις δύο υπολεκάνες 1 και 2 όπως και το 1945. Το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης του χειμάρρου γίνεται μονοκόρυφο με τιμές αιχμής (48,9, 88,5, 107,6 και 134,6 m<sup>3</sup>/s) αρκετά αυξημένες (κατά 22%, 33%, 32% και 31% αντίστοιχα) σε σχέση με αυτές που δίνονται για την σημερινή κατάσταση.

Οι Σαπουντζής κ.α. (2007) μελετώντας την υδρολογική συμπεριφορά του χειμάρρου «Γεραμπίνη» Ζαγοράς μετά από την κατασκευή φραγμάτων στερέωσης της κεντρικής κοίτης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα έργα αυτά συμβάλλουν κυρίως στη συγκράτηση των φερτών υλικών και λιγότερο στη μείωση των πλημμυρικών παροχών. Πράγματι σύμφωνα με τις Εξισώσεις (3.7) και (3.8), η επίδραση της κλίσης και του πλάτους της κοίτης στην ταχύτητα ροής και συνεπώς στους χρόνους συγκέντρωσης και επιβράδυνσης της λεκάνης απορροής είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την τραχύτητα που εκφράζεται με τον συντελεστή Manning. Μεταβολές στην κλίση και στο πλάτος της κοίτης μετά την εκτέλεση των φραγμάτων θα έχουν μικρή επίδραση στις πλημμυρικές παροχές. Ωστόσο όμως μεταβολές στον συντελεστή Manning λόγω της βλάστησης που αναπτύσσεται στις προσχώσεις των φραγμάτων και στις επιφάνειες της λεκάνης απορροής είναι σημαντικές για το χρόνο επιβράδυνσης και για τον χρόνο διόδευσης στις κεντρικές κοίτες. Η επίδραση αυτή της βλάστησης καταδεικνύεται με την εφαρμογή των μοντέλων ανεξάρτητα από την απόλυτη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Εδώ βρίσκεται και το κλειδί μιας πετυχημένης δασοτεχνικής διευθέτησης η οποία πρέπει να βασίζεται όχι αποκλειστικά στα τεχνικά έργα της κεντρικής κοίτης αλλά στο τρίπτυχο: α) τεχνικά έργα στις κεντρικές κοίτες, β) γεωτεχνικά στις χαραδρώσεις και στις διαβρωσιγενείς επιφάνειες και γ) φυτοκομικά έργα στην λεκάνη

απορροής. Αποσύνθεση του δασοτεχνικού συστήματος και εφαρμογή μόνο της μιας από τις τρεις κατηγορίες έργων οδηγεί σε αποτυχία (Μαργαρόπουλος, 1963).

**Πίνακας 7:** Αποτελέσματα για τις υπολεκάνες 1, 2 και την έξοδο (OUT)

1945													
Hyd. Element	Drain. Area (Km <sup>2</sup> )	20y			100y			200y			500y		
		peak (m <sup>3</sup> /s)	time (h:m)	vol (mm)	peak (m <sup>3</sup> /s)	time (h:m)	vol (mm)	peak (m <sup>3</sup> /s)	time (h:m)	vol (mm)	peak (m <sup>3</sup> /s)	time (h:m)	vol (mm)
1	16,03	53,2	9:52	17,1	89,1	9:48	26,5	105,8	9:48	30,8	129,1	9:46	36,8
2	7,016	55,8	9:24	24,2	83,4	9:24	35,4	95,5	9:24	40,4	111,8	9:24	47,1
OUT	23,584	82,6	9:30	19,3	134,9	9:44	29,3	159,3	9:44	33,8	193,0	9:42	40,0
Σήμερα													
1	16,03	28,8	10:30	11,2	52,7	10:20	19,0	64,5	10:18	22,7	81,2	10:16	27,8
2	7,016	33,9	9:30	17,2	55,0	9:28	26,7	64,7	9:28	31,0	77,9	9:26	37,0
OUT	23,584	40,1	9:34	13,0	66,4	10:20	21,2	81,3	10:16	25,1	102,4	10:14	30,5
Σενάριο													
1	16,03	30,5	10:02	11,2	55,7	9:56	19,0	68,1	9:54	22,7	85,8	9:52	27,8
2	7,016	33,9	9:30	17,2	55,0	9:28	26,7	64,7	9:28	31,0	77,9	9:26	37,0
OUT	23,584	48,9	9:54	12,9	88,5	9:50	21,2	107,6	9:48	25,1	134,6	9:48	30,5



**Εικόνα 6:** Υετογράφημα και αντίστοιχα υδρογραφήματα περιόδου T=100 έτη.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων δείχνουν μια δραστική επίδραση των ορεινών υδρονομικών έργων και των αλλαγών στις χρήσεις γης τα τελευταία 66 έτη, τόσο στις παροχές αιχμής όσο και στη μορφή των υδρογραφημάτων του χειμάρρου Ελαιώνα. Εκτός από την μείωση των συνολικών όγκων της απορροής (μέχρι και -33%), που ήταν αναμενόμενη, πιο αξιοσημείωτη ήταν η μεγάλη μείωση (μέχρι -51%) των πλημμυρικών αιχμών και λόγω της διάσπασης των υδρογραφημάτων από μονοκόρυφα σε δικόρυφα.

Η διάσπαση του μονοκόρυφου υδρογραφήματος εμφανίζεται σε ρέματα με σημαντικούς συμβάλλοντες και σχετικά μεγάλες διαδρομές. Είναι δυνατόν με κατάλληλα τεχνικά έργα και μέτρα διαχείρισης της παραποτάμιας βλάστησης το φαινόμενο αυτό να ενισχυθεί. Μπορούμε

για παράδειγμα με φυτεύσεις κατά μήκος των κοιτών και με τεχνικά έργα (φράγματα ανάσχεσης πλημμυρικού κύματος) να επιβραδύνουμε τις πλημμυρικές αιχμές σε ορισμένους κλάδους ενώ με καθαρισμούς της βλάστησης και τεχνητούς εγκιβωτισμούς να επιταχύνουμε την ροή σε κάποιους άλλους, επιτυγχάνοντας έτσι την χρονική απόκλιση μεταξύ των πλημμυρικών αιχμών τους. Στον χείμαρρο Ελαιώνα η διάσπαση του υδρογραφήματος οφείλεται στο γεγονός ότι στον κλάδο 1, με διαδρομή 6,7 km, τα τεχνικά έργα σταθεροποίησης της κοίτης και οι καλύτερες υγρασιακές συνθήκες επέτρεψαν την ανάπτυξη πλούσιας παραποτάμιας βλάστησης ενώ στον κλάδο 2 με αρκετά μικρότερη διαδρομή (1,4 km) και ξηρότερες συνθήκες η κοίτη παρέμεινε γυμνή χωρίς σημαντική βλάστηση.

Η μελέτη των λεκανών απορροής με την βοήθεια υδρολογικών μοντέλων κατά την φάση του σχεδιασμού των ορεινών υδρονομικών έργων πρέπει να περιλαμβάνει και την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων βάσει των οποίων είναι δυνατόν να επιλεγεί η βέλτιστη λύση. Επίσης με την παράλληλη χρήση και των μοντέλων διάβρωσης (Χρυσάνθου & Θεοδωρακόπουλος, 2006), προσφέρεται η δυνατότητα αντικειμενικής αξιολόγησης της απόδοσης των εκτελεσθέντων έργων σε λεκάνες απορροής χωρίς μετρήσεις.

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που δίνουν τα μοντέλα απαιτείται περισσότερη έρευνα με την εφαρμογή τους σε χειμαρρικές λεκάνες για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις παροχών για μια μεγάλη περίοδο που να καλύπτει το χρονικό διάστημα προ και μετά την εφαρμογή των έργων δασοτεχνικής διευθέτησης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Arcement G.J. & Schneider V.R., 1984. *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*, USGS, Water-supply Paper 2339.
- Barnes H., 1967. *Roughness Characteristics Of Natural Channels*, USGS Water-supply Paper 1849. US Government Printing Office, Washington, 219 pp.
- ESDB v2.0, 2005. *The European Soil Database (v 2.0)*, European Soil Bureau Network and the European Commission, EUR 19945 EN.
- ESRI, 2006. *ArcInfo 9 Using ArcGIS Desktop*, Environmental Systems Research Institute Inc.
- ESRI, 2009. *Arc Hydro Tools v1.3-Tutorial*, Environmental Systems Research Institute Inc.
- Felman A.D., 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*, USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 145 pp.
- Ford D., Pingel N., DeVries J.J., 2008. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Applications Guide*, USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 116 pp.
- Hutchinson M.F., 1989. *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*, Journal of Hydrology 106: 211-23
- NRCS, 2010. *National Engineering Handbook*, Part 630 Hydrology, USDA.
- Scharffenberg W. A. & Fleming M. J., 2008. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 3.2*, USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 288 pp.
- European Soil Bureau Network, European Commission, 2005. *Soil Atlas of Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, L-2995 Luxembourg, 128 pp.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1994. *Flood-Runoff Analysis*, EM 1110-2-1417, Washington, DC.
- ΙΓΜΕ, 1985. *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Σέρρες*, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Κοζάνης Σ., Μαρκόνης Ι., 2009. *Υδρογνώμων έκδοση 4 Οδηγός χρήστη (user manual)*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 141 σελ.



- Κοζάνης Σ., Χριστοφίδης Α., και Ευστρατιάδης Α., 2010. *Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων - έκδοση 4*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Ερευνητική Ομάδα ΙΤΙΑ, Αθήνα, 155 σελ.
- Κουτσογιάννης Δ., 1997. *Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 330 σελ.
- Κωτούλας Δ., 1985. *Διευθετήσεις Χειμαρρινών Ρευμάτων Μέρος Ι*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, 338 σελ.
- Κωτούλας Δ., 1986. *Μαθήματα Γενικής Υδρολογίας και Υδραυλικής*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 480 σελ.
- Μαργαρόπουλος Π., 1963. *Η Υδατική Διάβρωση και το χειμαρρινόν φαινόμενον*, Αθήναι.
- Μπαλούτσος Γ., Κουτσογιάννης Δ., Οικονόμου Α., Καλλίρης Π., 2000. *Διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής Ξηριά Κορίνθου στην καταιγίδα της 11-13 Ιανουαρίου 1997 με τη μέθοδο SCS*, Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 11 Τεύχος 1/2000 Σειρά II, σελ. 77-90.
- Ντάφης Σ., 1986. *Δασική Οικολογία*, Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 451 σελ.
- Παπαμίχος Ν., 1985. *Δασικά Εδάφη, Σχηματισμός, Ιδιότητες, Συμπεριφορά*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 384 σελ.
- Σαπουντζής Μ., Παπαθανασίου Θ., Μυρωνίδης Δ., Αγγελακόπουλος Ι., 2007. *Υδρολογική Συμπεριφορά του χειμάρρου «Γεραμπίνη» Ζαγοράς μετά από την κατασκευή φραγμάτων στερέωσης της κεντρικής κοίτης*, Υδροτεχνικά, 17: 89-102.
- Χρυσάνθου Β. & Θεοδωρακόπουλος Η., 2006. *Υπολογισμός υδρογραφήματος και στερεογραφήματος μιας πλημμύρας*, Υδροτεχνικά, 16: 91-106.